

Исследование мощной лампы бегущей волны W-диапазона с замедляющей системой меандрового типа и двухлучевым электронным потоком

Р.А. Торгашов^{1,2}, Д.А. Ножкин^{1,2}, А.В. Стародубов^{1,2}, А.Г. Рожнёв^{1,2}, Н.М. Рыскин^{1,2}

¹Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

²СГУ им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: в данной работе исследовалась полосковая замедляющая система (ЗС) типа металлический меандр с опорами для мощной двухлучевой лампы бегущей волны (ЛБВ) W-диапазона. Рассчитаны электродинамические параметры ЗС. Проведено моделирование электронно-волнового взаимодействия в модели двухсекционной ЛБВ с разрывом. Предложена технология изготовления рассматриваемых структур с использованием лазерной микрообработки медных пластин толщиной 200 мкм.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, замедляющая система, многолучевой электронный пучок, меандр

1. Введение

В последнее время большой интерес вызывает разработка миниатюрных электровакуумных приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн, в которых взаимодействие происходит с многолучевыми электронными пучками [1]-[5]. Одним из перспективных приборов в данном направлении является лампа бегущей волны (ЛБВ), которая способна обеспечить высокую выходную мощность и широкую полосу усиливаемых частот в непрерывном режиме работы. Одной из основных проблем, возникающих при проектировании приборов миллиметрового диапазона, является разработка и изготовление замедляющих систем (ЗС), характерные размеры которых сокращаются с ростом рабочих частот.

В данной работе представлены результаты разработки ЗС для ЛБВ W-диапазона с двухлучевым ленточным электронным потоком. Проведены расчеты электродинамических параметров ЗС, а также выходных характеристик лампы с использованием трехмерных программных пакетов. Предложена технология изготовления электродинамических структур с помощью лазерной микрообработки тонких медных пластин.

2. Электродинамические параметры

В качестве замедляющей системы для мощной двухлучевой ЛБВ W-диапазона предложена система типа меандр с металлическими опорами в прямоугольном волноводе сечением $a \times b = 1450 \times 960$ мкм². На рис. 1 представлена схема ЗС. Размеры ЗС представлены в таблице 1.

Для расчета электродинамических параметров в программном пакете COMSOL Multiphysics [6] был построен период системы с периодическими граничными условиями Флоке. Предполагалось, что вдоль меандра распространяются два ленточных электронных пучка сечением $w_b \times h_b = 1450 \times 100$ мкм² на расстоянии $h = 75$ мкм от поверхности ЗС до края пучков.

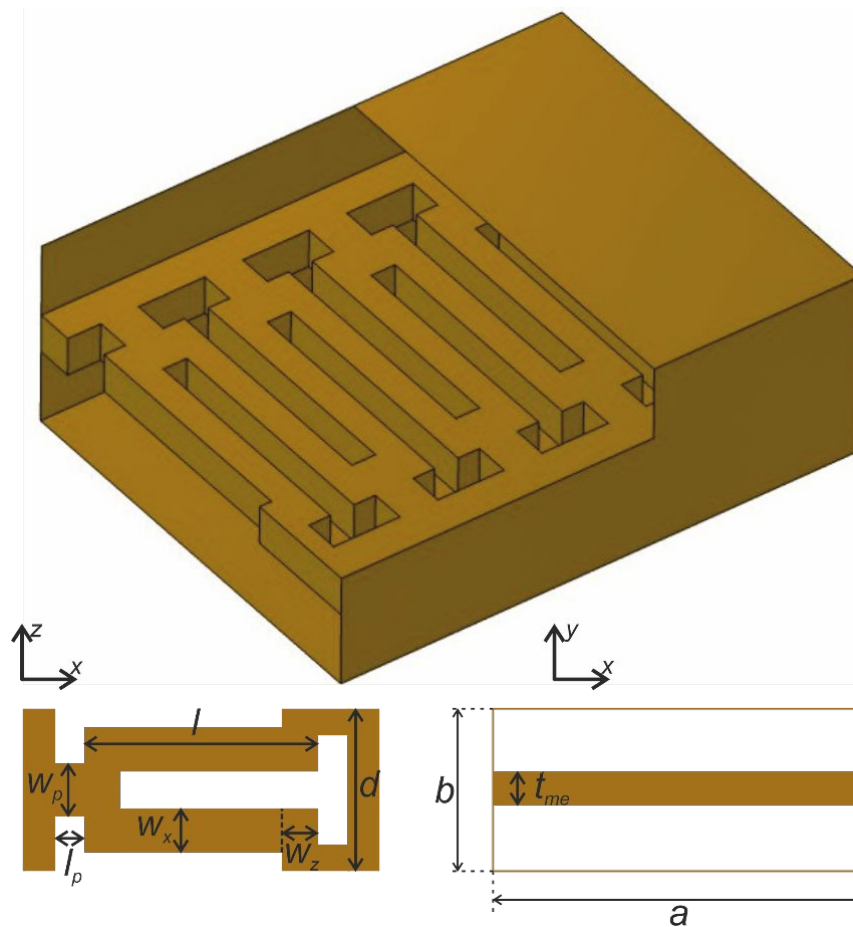


Рисунок 1. Схематичное изображение ЗС

Таблица 1. Геометрические размеры ЗС в мкм

d	l	w_x	w_z	w_p	l_p	t_{me}
550	1450	150	225	180	200	200

На рис. 2 представлены результаты расчета электродинамических характеристик. Полученные дисперсионные характеристики (рис. 2(а)) представляют собой две ветви, смыкающиеся на π -виде колебаний. Данный факт связан с наличием в системе плоскости скользящей симметрии. При указанных размерах синхронизм с пучком напряжением 14 кВ достигается на частотах порядка 95 ГГц. Получены также частотные зависимости сопротивления связи, которые представлены на рис. 2(б). Показано, что сопротивление связи принимает высокие значения до 40 Ом в диапазоне 90-100 ГГц.

Также исследованы S-параметры, для чего была построена полноразмерная модель, которая состоит из 30 регулярных периодов с устройствами ввода/вывода энергии. Расчет проводился в программном пакете CST Studio Suite [7]. В качестве материала ЗС была выбрана медь с эффективной проводимостью 3.0×10^7 См/м. Такое значение позволяет учитывать поверхностную шероховатость металла. Проведенные расчеты показывают, что в частотном диапазоне 90–100 ГГц потери на прохождение составляют 6–9 дБ, а потери на отражение не превышают –10 дБ.

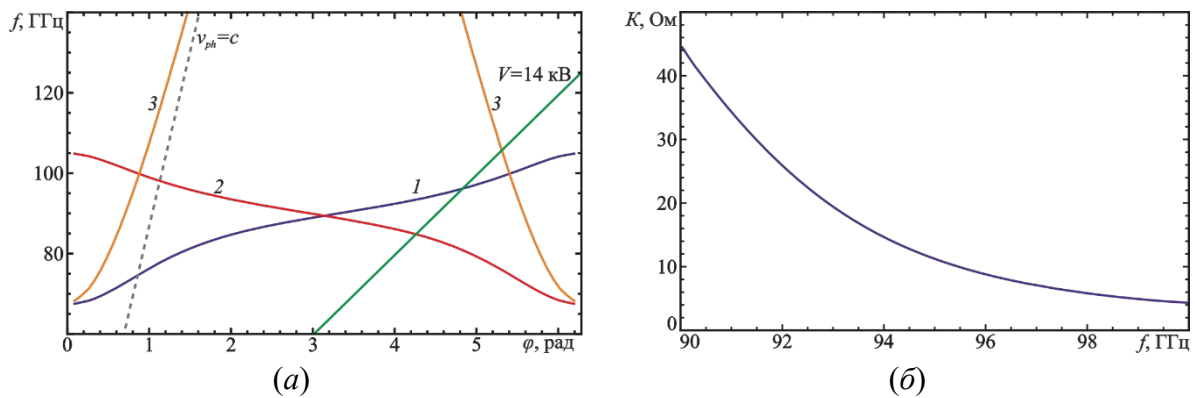


Рисунок 2. Электродинамические параметры ЗС: *a* – дисперсионная характеристика (1 – прямая гармоника, 2 – обратная гармоника, 3 – быстрая объемная мода); *б* – зависимость сопротивления связи, усредненного по поперечному сечению пучка, от частоты

3. Исследование режимов электронно-волнового взаимодействия

Расчет электронно-волнового взаимодействия проводился с помощью трехмерного метода «частиц в ячейках» в программном пакете CST Studio Suite. Предполагалось, что в системе распространяется прямоточный поток электронов, состоящий из двух ленточных пучков. Считалось, что электронные пучки идентичны и расположены симметрично относительно меандра. Ток каждого пучка составил 100 мА, а напряжение 14 кВ. Для фокусировки использовалась модель однородного продольного магнитного поля величиной 1 Тл.

Для подавления самовозбуждения на обратной гармонике и увеличения коэффициента усиления была разработана модель ЛБВ, которая состоит из двух идентичных секций длиной 30 периодов. В линейном режиме работы, когда входная мощность составляла 10 мВт, получены высокие значения усиления до 37 дБ на частоте 96.8 ГГц, а полоса усиления составляет более одного гигагерца. На рис. 3(а) представлена зависимость коэффициента усиления от частоты.

Максимальная выходная мощность в 121 Вт достигается на частоте 97.5 ГГц при входной мощности 0.23 Вт. На рис. 3(б) представлены амплитудные характеристики ЛБВ на частотах вблизи максимума выходной мощности. Показано, что в такой системе реализуется режим стационарного усиления без самовозбуждения, что подтверждается моделированием на больших временах до 30 нс.

4. Технология изготовления

Для изготовления образцов исследуемых ЗС была предложена технология на основе лазерной микрообработки наносекундными импульсами [8]. Образцы изготавливались из тонкой медной фольги толщиной 200 мкм. На первом этапе на основе разработанного макета системы осуществляется формирование предварительного канала лазерным излучением с наименьшей частотой следования импульсов. После чего с помощью лазерного излучения большей мощности формируются готовые прорезы заданной формы. Последующая обработка осуществляется с помощью ультразвуковой химической чистки, что позволяет очистить изготовленный образец от окислов металла и продуктов абляции. Изготовленные образцы также проходят морфологический анализ с использованием методов оптической и сканирующей микроскопии.

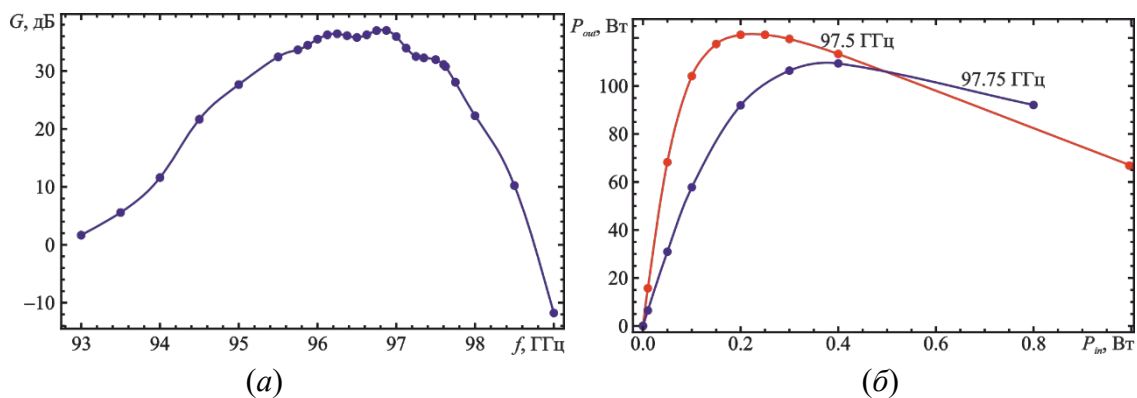


Рисунок 3. Выходные характеристики ЛБВ W-диапазона при токе пучков 200 мА и напряжении 14 кВ: *а* – зависимость коэффициента усиления; *б* – зависимость выходной мощности от входной

На этапе отработки технологии были изготовлены несколько образцов. Фотографии изготовленных образцов представлены на рис. 4. Показано, что выбор оптимального режима работы лазерной установки позволяет формировать подобные структуры с погрешностью изготовления не более 9 мкм.

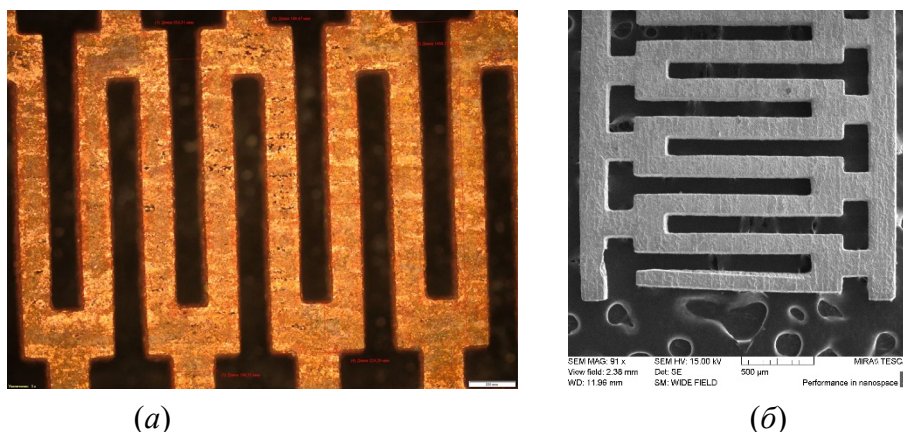


Рисунок 4. Результаты морфологического исследования: *а* – фотография с оптического микроскопа; *б* – фотография со сканирующего электронного микроскопа

3. Заключение

В данной работе представлены результаты разработки ЗС типа меандр с металлическими опорами для мощной двухлучевой ЛБВ W-диапазона. Показано, что в такой системе при напряжении пучка порядка 14 кВ возможен синхронизм на частотах вблизи 100 ГГц. Особенностью исследуемой системы являются высокие значения сопротивления связи в области рабочих частот. Разработана система ввода/вывода энергии, которая обеспечивает хороший уровень согласования (<-12 дБ). Омические потери составляют не более 0.27 дБ/период.

Проведено исследование режимов усиления в ЛБВ и проведен расчет выходных характеристик устройства. Показано, что в двухсекционной модели ЛБВ возможно получить коэффициент усиления более 30 периодов, а выходную мощность до 120 Вт при токе и напряжении пучка 200 мА и 14 кВ.

Дальнейшие исследования будут направлены на доработку системы согласования ЗС и оптимизацию конструкции ЛБВ с целью улучшения выходных характеристик. Также будет исследована возможность изготовления полноразмерной ЗС из наборного

пакета тонких медных пластин. Предполагается, что одна из пластин будет содержать меандровую линию, а другие формировать прямоугольный волновод. В последствии будет осуществляться пайка пакета лазерным излучением.

Работа выполнена при финансовой поддержке **Российского научного фонда (грант № 22-12-00181)**.

Список литературы

1. Shao W. et al. Stacked dual beam electron optical system for THz integrated wideband traveling wave tube // *Physics of Plasmas*. – 2019. – Т. 26. – №. – 6063106
2. Lu Z. et al. Novel double tunnel staggered grating slow wave structure for 0.2 THz traveling wave tube // *IEEE Electron Device Letters*. – 2020. – Т. 41. – № 2. – С. 284-287.
3. Wen Z. et al. A concentric arc meander line SWS for low voltage, high efficiency, and wide bandwidth V-band TWT with dual sheet beam // *IEEE Transaction on Plasma Science*. – 2021 – Т. 49. – №6 – С. 1842-1847
4. Torgashov G.V. et al. Meander-line slow-wave structure for high-power millimeter-band traveling-wave tubes with multiple sheet electron beam // *IEEE Electron Device Letters*. – 2019 – Т. 40 – № 12 – С. 1980-1983
5. Torgashov R.A. et al. Design study on a multiple-tunnel meander-line slow-wave structure for a high-power V-band traveling-wave tube // *IEEE Transaction on Electron Devices* – 2022. – Т. 29 – № 3. – С. 1396-1401
6. Comsol Multiphysics Engineering Simulation Software (COMSOL Inc., Burlington, MA, 2020), URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.
7. CST Studio Suite Electromagnetic Field Simulation Software, Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, France, 2020. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite>.
8. Ryskin N.M., et al. Development of microfabricated planar slow-wave structures on dielectric substrates for miniaturized millimeter-band traveling-wave tubes // *Journal of Vacuum Science & Technology B* – 2021. – Т. 39. – № 1. – 013204